doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.01.003

引用格式：石国华，袁博，郭进平，李泽琛，王小林，李角群，程平，石广斌. 矿岩破碎缓倾斜矿床地下开采关键技术与应用[J]. 矿冶，2026，35(1)：18-26.

SHI Guohua, YUAN Bo, GUO Jinping, LI Zechen, WANG Xiaolin, LI Jiaoqun, CHENG Ping, SHI Guangbin. Key technologies and applications for underground mining of fractured and gently inclined ore deposits[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(1): 18-26.

矿岩破碎缓倾斜矿床地下开采关键技术与应用

石国华[1] 袁 博[2] 郭进平[2] 李泽琛[2] 王小林[2] 李角群[3] 程 平[2] 石广斌[2]

（1. 中钢集团安徽刘塘坊矿业有限公司，安徽 六安 237471；
2. 西安建筑科技大学 资源工程学院，西安 710055；
3. 辽宁科技大学 矿业工程学院，辽宁 鞍山 114000）

摘 要：矿岩破碎缓倾斜矿床的开采一直是矿山工程中的技术难题。针对刘塘坊铁矿在现有采矿方法下开采此类矿体时面临的安全风险高、效率低等问题，本文开展了采矿方法与采场结构参数优化、多节理岩体中深孔爆破落矿技术及巷道围岩剥落控制技术等方面的系统研究。基于主客观组合赋权法，优选出分段空场嗣后充填采矿方法。通过FLAC3D数值模拟分析采场稳定性，综合考虑安全性与经济性，确定采场最佳结构参数为：长40 m、宽15 m，间柱厚度7 m。建立了基于不同节理裂隙发育程度的爆破性分级数据库，并开发了中深孔自动设计程序，实现了中深孔落矿爆破的精细化管控。采用工程类比与数值模拟相结合的方法，分析了矿山地应力分布特征，揭示了下盘脉外巷道围岩剥落破坏是矿体回采引起围岩应力重分布的结果，确定巷道与下盘矿岩交界面的最小安全距离为15~30 m，并提出了相应的巷道支护优化参数与动态调控措施。研究成果为刘塘坊铁矿实现安全、高效、经济开采提供了理论依据与技术支撑，每年可节约开采成本约3 747万元，对类似条件矿山具有参考价值。

关键词：破碎矿床；采矿方法优选；采场稳定性分析；中深孔爆破优化；巷道支护

中图分类号：TD8 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854（2026）01-0018-09

Key technologies and applications for underground mining of fractured and gently inclined ore deposits

SHI Guohua[1] YUAN Bo[2] GUO Jinping[2] LI Zechen[2] WANG Xiaolin[2]
LI Jiaoqun[3] CHENG Ping[2] SHI Guangbin[2]

(1. Sinosteel Anhui Liutangfang Mining Co. Ltd., Lu'an 237471, Anhui, China;
2. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
3. College of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114000, Liaoning, China)

Abstract: The mining of fractured and gently inclined ore deposits has long been a challenging technical problem in mining engineering. To address the issues of high safety risks and low efficiency in extracting such ore bodies at Liutangfang Iron Mine under existing mining methods, this study conducted systematic research on the optimization of mining methods and stope structure parameters, medium-length hole caving technology in multi-jointed rock masses, and control techniques for surrounding rock spalling in roadways. Based on a combined subjective and objective weighting method, the subsequent filling mining method with sublevel open stoping was selected as optimal. Through stability analysis of the stope using FLAC3D numerical simulation, and considering both safety

收稿日期：2024-11-14

基金项目：陕西省重点研发计划项目(2025SF-YBXM-535)；国家博士后研究人员计划项目(GZC20232063)；陕西省自然科学基金资助项目(2024JC-YBQN-0507)；陕西省博士后科研项目(2023BSHYDZZ142)

第一作者：石国华，硕士，高级工程师，从事金属矿山开采技术与安全管理研究。E-mail：664348197@qq.com

通信作者：王小林，博士，副教授；E-mail：18706841567@163.com

and economic factors, the optimal stope structure parameters were determined as follows: length 40 m, width 15 m, and rib pillar thickness 7 m. A blastability classification database based on the development degree of different joint fissures was established, and an automatic design program for medium-length holes was developed, achieving refined management of medium-length hole caving blasting. Using a combination of engineering analogy and numerical simulation, the distribution characteristics of in-situ stress in the mine were analyzed. It was revealed that the spalling failure of the surrounding rock in the footwall external roadway results from stress redistribution caused by ore body extraction. The minimum safe distance between the roadway and the footwall ore-rock interface was determined to be 15–30 m, and corresponding optimization parameters and dynamic control measures for roadway support were proposed. The research results provide theoretical basis and technical support for the safe, efficient, and economical mining of Liutangfang Iron Mine, enabling annual savings in mining costs of approximately 37.47 million yuan. This study offers valuable reference for similar mining conditions.

Key words: fractured deposit; mining method optimization; stope stability analysis; medium-length hole blasting optimization; roadway support

中钢集团安徽刘塘坊矿业有限公司刘塘坊铁矿为设计生产能力150万$t\cdot a^{-1}$的采选联合企业，矿区保有资源储量约$7\,428\times10^4$ t，其中工业储量$4\,900\times10^4$ t，远景储量$2\,600\times10^4$ t。矿体产状变化大、数量多，整体被厚约260 m的第四系黏土、亚黏土及砂砾层覆盖。矿体顶、底板直接围岩主要为变粒岩、黑云斜长变粒岩、角闪斜长变粒岩及混合岩化斜长片麻岩等，局部为片麻岩与片岩类岩石。其中古风化带岩组（Ⅱ）含裂隙承压水，岩体完整性差，岩石质量等级为Ⅴ级，稳固性较差；其余矿岩强度较高，岩石质量中等，属完整~较完整的半坚硬~坚硬岩石，总体稳固性较好。矿体倾角30°~40°，平均厚度15 m，目前采用点柱式上向水平充填法开采。

在破碎缓倾斜矿体开采方面，已有研究积累了若干成果：刘嘉伟等[1]通过岩体质量评价优化顶板支护技术，提出集群式液压支柱护顶的空场嗣后充填采矿法，采用DW25-250/100型液压支柱支护破碎顶板，取得良好经济效益；王小林等[2]基于贝叶斯与蒙特卡洛法构建综合评价体系优选采矿方法，通过17项指标确定浅孔进路Ⅴ型掏槽后退采矿法为最优方案，并开展稳定性分析以平衡采场跨度与矿石回收率；丁航行等[3]将双进路分流出矿工艺应用于无底柱分段崩落法，在破碎缓倾斜矿体中有效降低贫化率并提升回采率；张宏伟等[4]采用上向水平进路分层充填法开采该类矿体，提高了生产效率并实现地压有效控制；代涵等[5]利用中深孔空场嗣后充填法配合导向钻杆纠偏中深孔施工，结合自动化与手动铲运机，适应复杂矿体并满足生产需求。

刘塘坊铁矿经多年生产实践，仍面临以下突出问题：1）现有点柱式上向水平充填采矿法需人员在暴露顶板下作业，而顶板层状裂隙发育、稳固性差，易引发冒顶事故；2）缺乏专业矿山软件支持，爆破设计效率低，技术人员配备不足；3）受矿体回采影响，下盘脉外巷道围岩出现剥落破坏，需重新调整支护措施。针对上述制约安全生产的关键问题，本文系统开展采矿方法与采场结构参数优化、多节理岩体中深孔爆破落矿技术、巷道围岩剥落机理与治理对策等方面的研究，以期为刘塘坊铁矿及类似矿山的安全、高效开采提供理论依据与技术支撑。

1 采矿方法优选及采场结构参数优化

1.1 基于主客观组合赋权的采矿方法优选技术

根据矿床工程地质与水文地质条件、矿体赋存特征以及矿岩力学性质，参考类似矿山经验与采矿方法选择原则，在综合分析各类采矿方法适用条件的基础上，初步筛选出三种可行的充填采矿方案：点柱式上向水平分层充填法、分段空场嗣后充填法、分段凿岩阶段空场嗣后充填法。

综合考虑技术经济指标（采矿成本、采切比、回收率、贫化率）、劳动生产率指标（采场生产能力、采矿工效、灵活适应性、工艺繁简度、劳动强度）及生产安全性指标（通风条件、工作面安全性、地表塌陷），构建采矿方法优选的多目标决策指标体系[6]。基于技术人员与专家意见，通过Delphi咨询与反复修订，将优选体系划分为目标层、准则层与指标层（图1）。在该体系下，采矿方法优选需依次确定组合权重矩阵与隶属度矩阵，进而通过模糊综合评价实现方案优选。

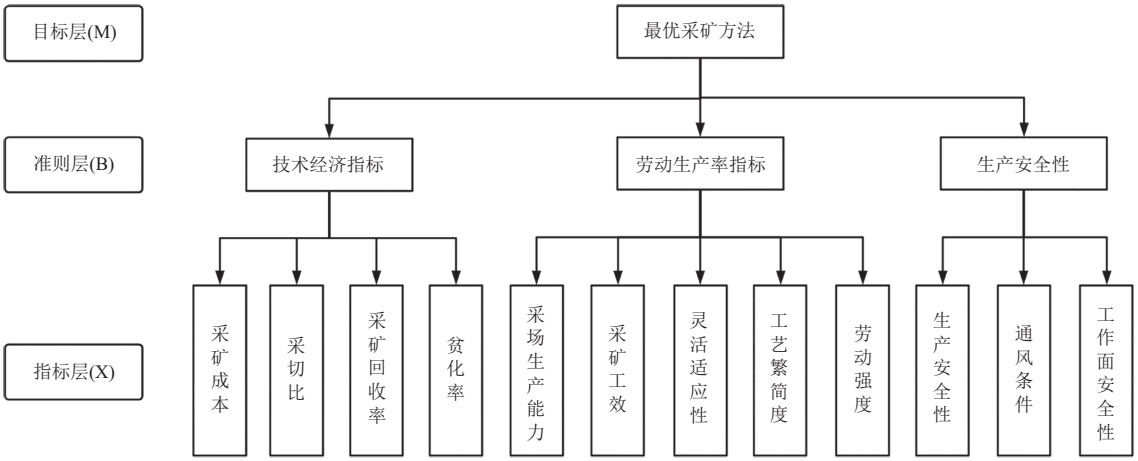


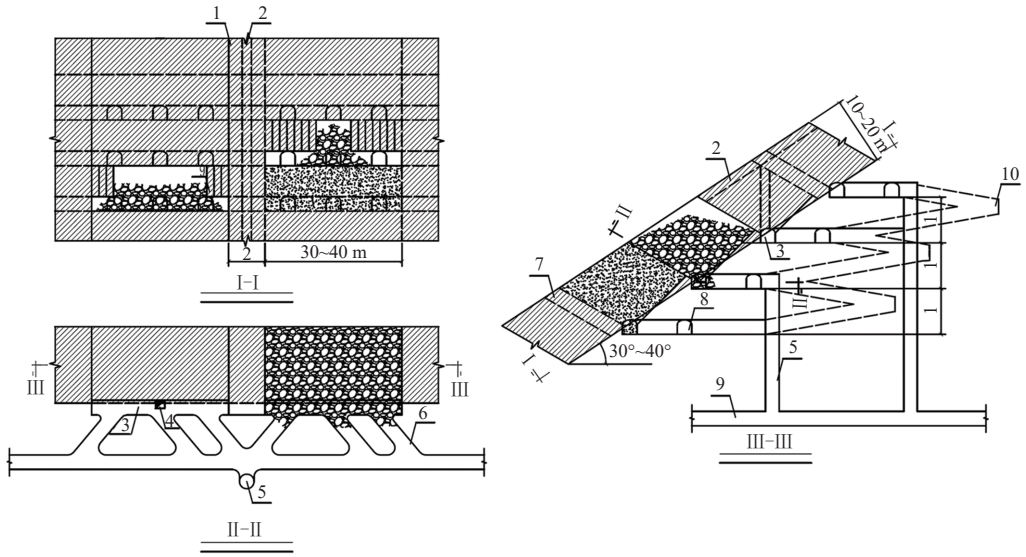
图1　评价指标层次模型

Fig. 1　Hierarchical model of evaluation indicators

上述12项指标可分为定量与定性两类。定量指标包括采切比、采矿成本、贫化率、回收率、采场生产能力与采矿工效；其余为定性指标。定量指标中，采矿回收率、采矿工效和采场生产能力属于效益型指标；采矿成本、贫化率和采切比为成本型指标。由于各定量指标物理属性、单位与量级不同，采用极差变换法进行标准化，形成定量指标隶属度矩阵。定性指标则通过专家打分建立模糊优先关系系数矩阵，再经平均法计算隶属度。最终，结合定量与定性指标的标准化结果，确定各方案指标隶属度矩阵。

组合权重矩阵的确定分为两步：首先基于专家构建的目标层与准则层模糊判断矩阵，采用模糊层次分析法（FAHP）确定各指标主观权重；随后依据专家对各项定性指标的重要性评价，利用熵权法[7]计算客观权重。在此基础上，引入灰色关联分析法改进主客观赋权组合原则，依据指标重要性等级及主客观权重的排序关系，计算综合组合权重。

最后，利用所得组合权重矩阵与隶属度矩阵，通过矩阵乘法计算综合评价结果，确定分段空场嗣后充填法[8]为刘塘坊铁矿最优采矿方案，如图2所示。该方法采用无轨运输设备，灵活性强，回采强度高；分段矿房回采后及时充填，矿石回收率高，有利于后续分段开采。其主要缺点是采准工程量大，采空区充填工艺较为复杂。



1—间柱；2—充填斜井；3—堑沟；4—切割天井；5—溜井；6—装矿进路；
7—底柱；8—出矿巷道；9—中段运输巷道；10—采区斜坡道

图2　分段空场嗣后充填法

Fig. 2　Subsequent filling mining method with sublevel open stoping

如图2所示，采场沿走向布置，矿块划分为若干分段，分段高度10 m，矿房宽度取矿体厚度，长度后续根据采场稳定性确定。采场内留设间柱与分段斜顶柱，间柱中布置充填井。回采以分段为单位，自下而上顺序进行，嗣后充填。分段矿房回采期间，依托矿岩自身稳固性控制地压；斜顶柱则用于分隔已充填的下部分段矿房。

采准工程主要包括采区斜坡道（3.6 m × 3.6 m，坡度15%）、分段联巷、出矿巷道、装矿进路、堑沟（兼凿岩巷）、采场充填斜井、脉外溜井及溜井联络道等。自阶段运输巷道掘进斜坡道，连通各下盘分段出矿平巷（3.2 m × 3.2 m）。沿矿体走向每隔约100 m布置一条放矿溜井，各分段水平掘进下盘分段出矿平巷，并沿走向每隔10~12 m施工装运巷道（3.2 m × 3.2 m），装矿进路与出矿巷道夹角为50°；在装矿进路端部矿体底板区域掘进分段凿岩巷道（3 m × 3 m），兼作受矿堑沟；充填斜井布置于间柱中部顶板位置。

切割回采作业主要包括：在矿房中部掘进切割横巷（3 m × 3 m），自该横巷向分段矿房最高处施工切割天井（1.5 m × 1.5 m）。在切割横巷中钻凿中深孔，以切割天井为自由面，爆破形成切割槽。各分段凿岩巷道内采用YGZ-90凿岩机钻凿上向扇形孔，自切割槽向两侧退采。崩落矿石经装矿进路、出矿巷道，由3 m^3铲运机运至溜井，最终经阶段运输巷道装车外运。

1.2 采场结构参数优化技术

基于刘塘坊铁矿工程地质与环境条件，结合分段空场嗣后充填采矿法的特点，采用Mathews图解法[9,10]初步确定采场结构参数。根据矿山实测数据，计算得岩体*RMR*值为64.00，修正岩石*Q*值为9.23，岩石应力系数*A*为1.00，节理方位系数*B*为0.85，重力调整系数*C*为2.97，最终求得采场稳定性系数*N*为23.30。进一步结合Mathews稳定性图中*N*值与采场暴露面水力半径*R*的对应关系，确定满足稳定要求的水力半径*R*为7.2 m，采场极限跨度可达51 m。

在Mathews图解法初选结果的基础上，设定采场跨度分别为50、40、30 m，间柱宽度分别为6、7、8 m，共组成9组参数方案。采用FLAC3D软件[11]对各方案进行采场结构稳定性数值模拟分析，主要考察顶板拉应力、位移及塑性区体积等指标。

通过对9组方案的模拟计算，从应力分布、塑性区体积与位移量等方面进行系统分析，并基于多指标赋权综合评价方法，综合考量位移量、最大拉应力及矿石损失率三方面因素，在安全性与经济性平衡的基础上对各方案进行比较[8]，最终确定最优采场结构参数为：采场长度40 m，采场宽度15 m，间柱厚度7 m。

2 多节理岩体中深孔爆破落矿技术

2.1 矿岩爆破性分级技术

矿岩爆破性分级研究的技术路线如图3所示。首先，通过实验室岩石纵波测试与三轴压缩试验，分析节理发育条件下岩石的动力学强度、应变率等力学特性。其次，开展现场爆破漏斗试验、爆破振动监测及爆炸应力波检测，获取实际爆破响应数据。随后，根据现场试验结果，确定不同节理发育类型（水平节理、垂直节理、交错节理）条件下的中深孔爆破参数。最后，基于节理裂隙发育特征与爆破块度线性指标，结合综合质量评价判据，完成岩体爆破性分级[12]，分级结果如表1所示。

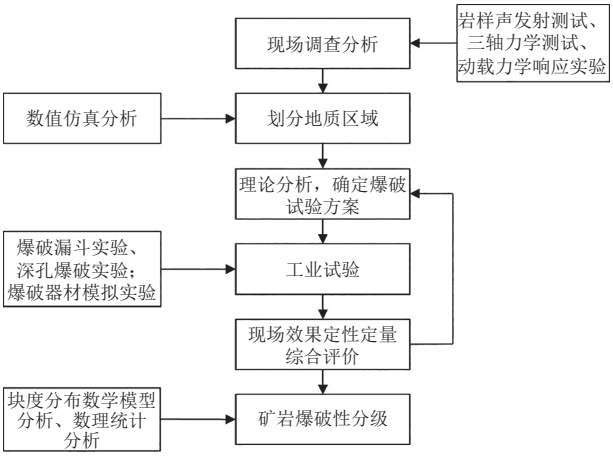


图3 矿岩爆破性分级技术路线

Fig. 3 Technical route for rock blastability classification

表1 矿岩爆破性分级

Table 1 Rock blastability classification

分级之前炸药单耗/(kg·m^{-3})	爆破性分级			
	爆破性指数	爆破性	等级	炸药单耗/(kg·m^{-3})
1.008~1.344	68.001~74	难	7	2.61
			8	2.17
	60.001~68	中上等	9	1.63
			10	1.36
	53.001~60	中等	11	1.09
			12	0.87
	46.001~53	中下等	13	0.65
			14	0.54
	38.001~46	易爆	15	0.43
	29.001~38		16	0.33

2.2 基于多节理岩体的爆破参数设计技术

炮孔直径为65 mm，边孔角为55°。综合采用经验公式、工程类比与现场试验等方法，确定中深孔爆破参数如下：最小抵抗线1.5~2.0 m，炮孔密集系数1.0~1.2，孔底距1.5~2.0 m，孔口距0.4~0.5 m。炸药单耗根据爆破性分级进行选取（表1）。起爆方式上，边孔采用导爆管孔口起爆，其余炮孔采用孔底起爆。在多节理岩体中深孔爆破落矿中，采用逐孔起爆技术，其延期时间设置见表2。

表2 多节理岩体多排中深孔爆破落矿延期组合

Table 2 Delay combination design for multi-row medium-length hole blasting in multi-jointed rock mass

节理类型	孔间延期时间/ms	排间延期时间/ms	孔内延期时间/ms
垂直节理	25	75	490
平行节理	25	75	490
混合节理	50	110	490

2.3 中深孔优化设计技术

中深孔优化设计的核心是在保证孔底距处于合理范围内的前提下，使每排炮孔总长度最小化[13]。为此，基于最短路径原理[14]，开发了中深孔优化设计程序，并将其嵌入矿山常用的AutoCAD软件中（图4）。通过输入相关爆破参数，程序可自动生成炮孔布置图。与传统手工作图试错法相比，该程序不仅大幅提高了炮孔设计效率，还可节约约15%的炮孔长度。图5展示了基于Dijkstra算法的中深孔优化程序设计技术路线。

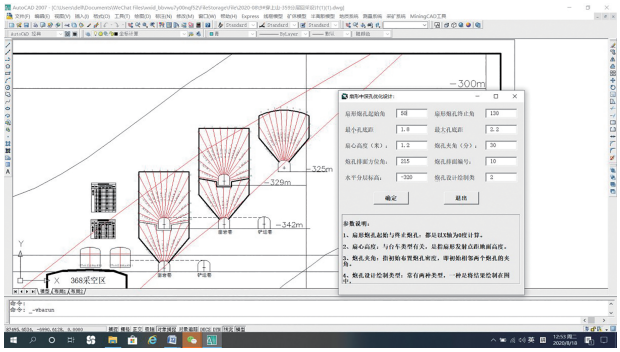


图4 中深孔优化设计程序

Fig. 4 Optimization design program for medium-length holes

2.4 深部脉外巷道围岩剥落治理技术

2.4.1 矿区地应力反演技术

刘塘坊矿区与邻近矿区在地形地貌、地质构造方面较为相似，因此借助邻近矿区地应力测试结果

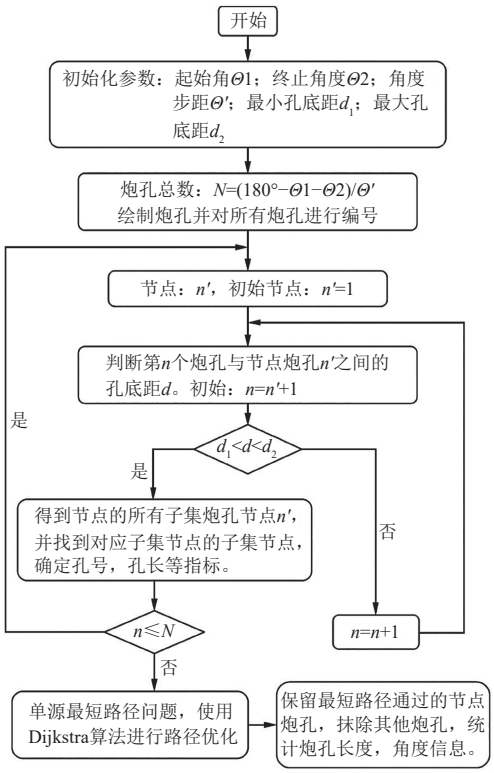


图5 Dijkstra算法中深孔优化程序设计路线图

Fig. 5 Design roadmap of Dijkstra algorithm-based optimization for medium-length holes

及本区域地压显现规律，结合地质构造特征与数值分析，综合确定了矿区初始地应力分布（图6）。矿体分布对矿床整体初始地应力场影响较小，矿区地应力主要受构造控制：在−500 m左右深度，地应力场以构造水平应力为主导；在−400 m左右较浅部，则以自重应力场为主。通过工程类比与数值模拟，得到矿区深部三维初始地应力场的计算公式：

$$\sigma_x = 27.2z+2580.0 \quad (1)$$

$$\sigma_y = 30.37z+2877.0 \quad (2)$$

$$\sigma_z = 20.7z+1961.0 \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = 0.54z+51.1 \quad (4)$$

$$\tau_{yz} = -0.261z-24.7 \quad (5)$$

$$\tau_{zx} = 5.64z+534.4 \quad (6)$$

式中，z是地表以下深度，m。

2.4.2 破碎巷道支护技术

数值分析结果揭示了脉外巷道围岩剥落破坏的机理[15]（图7），并证实该破坏主要由矿体回采引起的下盘脉外巷道围岩应力重分布所致，而非回采爆破振动直接造成。落矿过程对巷道塑性区扩展的影响与下盘岩体物理力学性质密切相关，脉外巷道与下

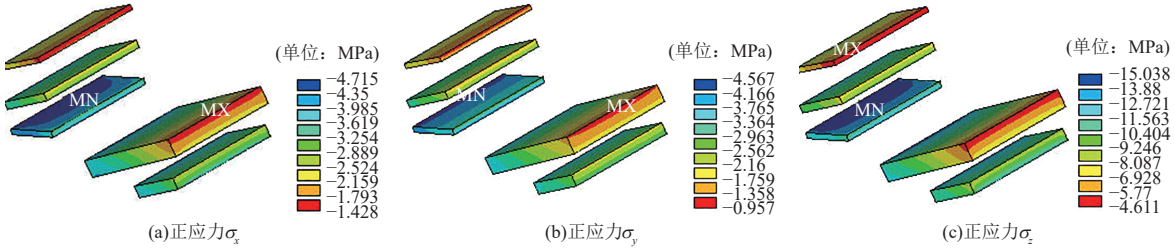


图6　矿体周边应力场分布

Fig. 6　Stress field distribution around the ore body

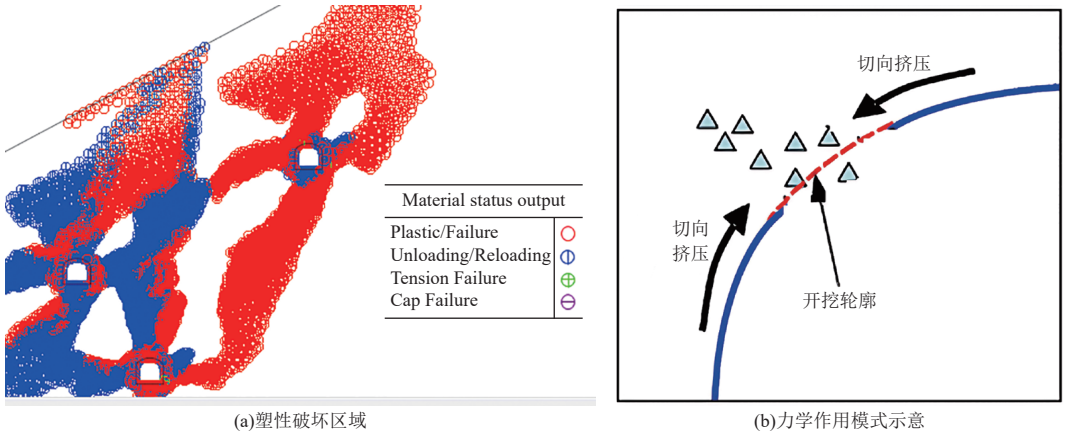


图7　脉外巷道附近围岩剥落分析

Fig. 7　Spalling analysis of surrounding rock near the external roadway

盘矿岩交界面之间的最小距离宜控制在15~30 m，围岩条件较好时取较小值。

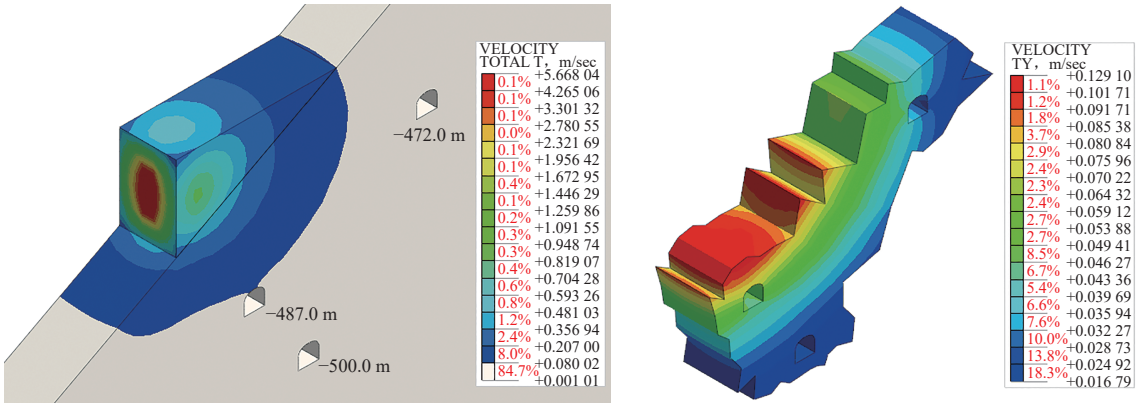
依据《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》（GB 50086—2015），结合类似工程经验及相关经验公式[16-18]，拟定了不同类别巷道围岩的支护参数，见表3。

进一步采用萨道夫斯基公式[19]与三维数值模拟方法，计算了采场爆破在巷道围岩中引起的振动速度（图8）。结果表明，巷道附近围岩的最大振动速度出现在−487.0 m水平脉外巷道，其垂直巷道走向的水平方向振动速度相对较大，最大值为8.42 cm·s^{-1}，低于允许的爆破质点振动速度阈值（15.0~30.0 cm·s^{-1}）。这说明所采用的巷道支护优化参数及动态调整措施具有良好的工程效果。

表3　不同类别巷道围岩的支护参数

Table 3　Support parameters for different types of roadway surrounding rock

巷道围岩类别	支护材料	墙	拱
Ⅲ	锚杆	直径18 mm，长2.0 m，间排距1.0 m × 1.0 m	直径18 mm，长2.0 m，间排距1.0 m × 1.0 m
	钢筋网	直径为6.0 mm，网度100.0 mm × 100.0 mm	直径为6.0 mm，网度100.0 mm × 100.0 mm
	混凝土	喷射混凝土C20，厚8 cm	喷射混凝土C20，厚8 cm
Ⅳ	锚杆	直径18 mm，长2.5 m，间排距1.0 m × 1.0 m	直径18 mm，长2.5 m，间排距1.0 m × 1.0 m
	钢筋网	直径6.0 mm，网度100.0 mm × 100.0 mm	直径6.0 mm，网度100.0 mm × 100.0 mm
	混凝土	喷射混凝土C20，厚10 cm	喷射混凝土C20，厚10 cm
	拱架	钢支撑，I18-20，间距0.8~1.2 m	钢支撑，I18-20，间距0.8~1.2 m
Ⅴ	锚杆	直径18 mm，长2.5 m，间排距1.0 m × 1.0 m	直径18 mm，长2.5 m，间排距1.0 m × 1.0 m
	钢筋网	直径6.0 mm，网度100.0 mm × 100.0 mm	直径6.0 mm，网度100.0 mm × 100.0 mm
	混凝土	喷射混凝土C20，厚15 cm	喷射混凝土C20，厚15 cm
	拱架	钢支撑，I18-22，间距0.5~1.0 m	钢支撑，I18-22，间距0.5~1.0 m



(a)总速度　　(b)*Y*方向速度

图8　振动速度分布

Fig. 8　Distribution of vibration velocity

3　应用效果与经济效益

自2020年起，研究成果在中钢集团安徽刘塘坊矿业有限公司得到应用，对地下矿山采矿生产管理产生了显著提升，主要体现在以下方面：

1）采矿方法与结构参数优化

优化后的分段空场嗣后充填法，克服了原采矿方法作业人员与设备在暴露顶板下作业、效率低等问题，显著提升了采场安全性，满足岩移控制要求，适用于长期稳定开采。优化后的采场结构参数降低了矿石损失率与贫化率，减少了采准工程量，提高了矿山回采率与经济效益。新方法应用后，井下备采矿量显著增加，保障了矿山稳产高产；原上向分层浅采方法受人员与工艺限制，备采矿量不足一个月，严重影响生产。新方法单个中深孔矿房矿量平均约3.5万t，井下备采矿量可维持3个月以上。原方法单班产量低，且受工艺限制需当班及时铲运，导致设备效率低下；以2 m^3铲运机为例，原设备单台每年的台效为5万t，新方法应用后，单矿房矿量增加，设备台效大幅提升至9.6万t。2020—2022年累计采出铁矿石450.5万t，年均达150万t，实现矿山设计产能。原采矿方法承包单价为每吨原矿59.28元，新方法降至每吨原矿35.65元，仅此一项成本降低39.8%，年节约采矿成本约3 544.5万元，显著提升了矿山经济效益。

2）爆破精细化管控与成本节约

通过爆破性分级，开展了不同地质条件等因素对爆破效果的综合评价分析，获得了各类爆破条件下的最佳参数组合，为矿山精细化爆破设计与施工提供了重要依据。基于最短路径原理的中深孔自动设计程序，在确保设计原则的前提下，减少了每排炮孔总长度，每吨原矿降低中深孔凿岩成本0.18元、炸药成本0.12元；中深孔爆破大块率显著下降，每吨原矿节约井下放矿、运输及粗破成本1.05元，年节约成本202.5万元，实现了凿岩爆破作业的精细化管理。

3）巷道支护优化与动态调控

依据巷道围岩工程地质条件，参考相关技术规范、类似工程及经验公式，提出了巷道支护优化参数与动态调整对策。该措施实现了安全、经济、高效的目标，提高了支护工作效率，降低了材料消耗，为巷道围岩支护与成本控制提供了新的技术途径。

4）综合效益

新技术的应用保障了刘塘坊铁矿正常生产，有力维护了矿山500余名职工就业，带动了矿区周边企业与村民增收，对地方经济发展起到积极推动作用。同时，新技术大幅提升了矿山安全生产水平，有效保障了作业人员安全，避免了因矿难引发的社会问题。此外，采用尾砂胶结充填工艺，大量消纳选矿尾砂，显著减少了地表尾矿库与井下采空区灾害风险，取得了良好的生态环境效益。

4　结论

1）通过主客观组合赋权法优选出分段空场嗣后充填采矿方法，结合FLAC3D数值模拟分析采场稳定性，统筹安全与经济性，确定最佳采场结构参数为长40 m、宽15 m、间柱厚7 m。该工艺在保障回采安全的前提下，实现年产150万t的设计产能，年节约采矿成本约3 544.5万元。

2）建立了基于不同节理裂隙发育程度的爆破性分级数据库，研发中深孔自动设计程序，实现了中深孔落矿爆破的精细化管理，年节约凿岩、炸药及大块二次处理费用约202.5万元。

3）采用工程类比与数值模拟方法，分析了矿山地应力分布特征，揭示了下盘脉外巷道围岩剥落破坏源于矿体回采引起的围岩应力重分布，确定巷道与下盘矿岩交界面最小安全距离为15~30 m，并提出相应的支护优化参数与动态调整对策，保障了采场爆破扰动下巷道的稳定运行。

上述关键技术的集成应用，有效支撑了刘塘坊铁矿安全、高效、经济开采，取得了显著的安全、环保、社会与经济效益，对类似条件矿山具有重要参考价值。

参考文献

[1] 刘嘉伟, 黄明清, 陈霖, 等. 缓倾斜破碎矿体集群式液压支柱护顶空场嗣后充填采矿法研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(8): 1-6.
LIU J W, HUANG M Q, CHEN L, et al. Open stoping and subsequent backfill under clustered hydraulic prop roof support for gently-inclined broken orebody[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(8): 1-6.

[2] 王小林, 李泽琛, 郭进平, 等. 基于Bayes算法与数值模拟的缓倾斜破碎薄矿体采矿方法优选[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(2): 58-66.
WANG X L, LI Z C, GUO J P, et al. Optimization of mining method for gently inclined broken thin vein based on Bayes algorithm and numerical simulation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(2): 58-66.

[3] 丁航行, 韩智勇, 任凤玉, 等. 谦比西铜矿缓倾斜中厚破碎矿体分流出矿技术[J]. 金属矿山, 2016(1): 13-16.
DING H X, HAN Z Y, REN F Y, et al. Divided-flow drawing technology of gently inclined medium-thick broken ore bodies in Chambishi copper mine[J]. Metal Mine, 2016(1): 13-16.

[4] 张宏伟, 张富兴, 孙胜, 等. 缓倾斜破碎矿体高效进路充填采矿方法研究与应用[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(6): 899-907.
ZHANG H W, ZHANG F X, SUN S, et al. Research and application of high-efficiency drift backfill mining method in gently inclined broken orebody[J]. Gold Science and Technology, 2021, 29(6): 899-907.

[5] 代涵, 张金钟, 邢鹏, 等. 缓倾斜中厚破碎矿体上向中深孔分条空场嗣后充填法[J]. 中国有色金属, 2023(增刊1): 136-139.
DAI H, ZHANG J Z, XING P, et al. Upper middle-deep hole division open stope subsequent filling method for gently inclined medium-thick broken ore body[J]. China Nonferrous Metals, 2023(Sup.1): 136-139.

[6] 展卫露, 张忠传, 李正明, 等. 锡铁山铅锌矿采矿方法优选及采场结构参数优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(8): 48-55.
ZHAN W L, ZHANG Z C, LI Z M, et al. Optimal selection of mining methods and optimization of stope structure parameters in Xitieshan lead-zinc mine[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(8): 48-55.

[7] YANG S, ZHANG X, LIANG J, et al. Research on optimization of monitoring nodes based on the entropy weight method for underground mining ventilation[J]. Sustainability, 2023, 15(20): 14985.

[8] 郭进平, 晏承园, 张雯, 等. 分段矿房嗣后充填采矿采场结构参数优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(10): 1-7.
GUO J P, YAN C Y, ZHANG W, et al. Optimization study on stope structure parameters of sublevel open stoping with backfill[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(10): 1-7.

[9] 尹修平, 冯家宁, 吉豫庆, 等. 基于Mathews稳定性图解法的某矿山空场采矿法优化[J]. 黄金, 2023, 44(11): 28-31.
YIN X P, FENG J N, JI Y Q, et al. Optimization of open stope mining method in a mine based on Mathews stability graphic method[J]. Gold, 2023, 44(11): 28-31.

[10] 王玉丁, 林卫星, 欧任泽, 等. 分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法采场跨度的优化[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(6): 19-25.
WANG Y D, LIN W X, OU R Z, et al. Optimization of stope span for sublevel drilling stage open stope with subsequent filling mining method[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(6): 19-25.

[11] 黄松, 王俊, 乔登攀, 等. 六边形进路开采围岩稳定性的多因素影响分析[J]. 矿冶, 2023, 32(4): 1-5.
HUANG S, WANG J, QIAO D P, et al. Analysis of multi-factor influence on surrounding rock stability in hexagonal approach mining[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(4): 1-5.

[12] 张阳阳, 王炳炜, 林健, 等. 蚕庄金矿破碎围岩矿体爆破条件分级与控制爆破技术[J]. 黄金, 2021, 42(2): 36-40.
ZHANG Y Y, WANG B W, LIN J, et al. Blasting conditions classification and control blasting technology for ore bodies with fragmented surrounding rock in Canzhuang gold mine[J]. Gold, 2021, 42(2): 36-40.

[13] 郭进平, 刘益超, 李角群, 等. 基于三维巷道模型的深孔爆破扇形布孔优化设计[J]. 工程爆破, 2021, 27(2): 66-72.
GUO J P, LIU Y C, LI J Q, et al. Optimization design of fan-shaped hole layout for deep-hole blasting based on 3D tunnel model[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(2): 66-72.

[14] 刘益超, 郭进平, 李角群, 等. 基于Floyd算法的扇形中深孔爆破布孔优化设计[J]. 爆破, 2021, 38(1): 64-69, 152.
LIU Y C, GUO J P, LI J Q, et al. Optimal design of hole arrangement for fan-shaped medium-length-hole blasting based on Floyd algorithm[J]. Blasting, 2021, 38(1): 64-69, 152.

[15] 石国华, 白银, 石广斌. 刘塘坊铁矿3#矿体下盘深部脉外巷道围岩剥落原因分析及处理措施[J]. 矿业工程, 2021, 19(4): 7-10.

SHI G H, BAI Y, SHI G B. Reason analysis and treatment measures for peeling-off of surrounding rock around the outside tunnel of deep vein of lower plate at Liutangfang iron ore 3# mineral body[J]. Mining Engineering, 2021, 19(4): 7-10.

[16] 王贤来，崔继强，张鹏强，等. 静动载条件下深部破碎巷道支护设计及稳定性分析[J]. 金属矿山，2024(7): 17-23.
WANG X L, CUI J Q, ZHANG P Q, et al. Support design and stability analysis of deep fractured roadway under static and dynamic condition[J]. Metal Mine, 2024(7): 17-23.

[17] 王志修，原野，于世波. 逆断层影响区域破碎巷道稳定性控制对策分析[J]. 矿冶，2022, 31(4): 1-6.
WANG Z X, YUAN Y, YU S B. Stability control strategy analysis of broken roadway in affected area of reverse fault[J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(4): 1-6.

[18] 张亭，李军民，郭生茂，等. 深部铜矿破碎岩体巷道支护参数优化研究[J]. 矿冶，2019, 28(3): 17-21.
ZHANG T, LI J M, GUO S M, et al. Optimization of roadway support parameters for cracked rock mass in deep copper mine[J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28(3): 17-21.

[19] 杜军，花良奎，厉美杰，等. 露天采场台阶爆破萨道夫斯基公式的线性回归分析[J]. 爆破，2025, 42(2): 1-11.
DU J, HUA L K, LI M J, et al. Linear regression analysis of Sadovsky formula for open-pit bench blasting[J]. Blasting, 2025, 42(2): 1-11.